

Transmission Dependent Convolution Subtraction  
Method for Correction of Scattered Photons in  
Quantitative Measurement by Single Photon CT  
and 3D Positron CT(単一光子断層装置および3次元  
陽電子断層装置における定量測定のための散乱線差  
引補正法の開発に関する研究)

著者	成田 雄一郎
号	2077
発行年	1997
URL	<a href="http://hdl.handle.net/10097/7350">http://hdl.handle.net/10097/7350</a>

氏名	なり た ゆう いち ろう 成 田 雄 一 郎
授与学位	博士（工学）
学位授与年月日	平成10年3月25日
学位授与の根拠法規	学位規則第4条第1項
研究科、専攻の名称	東北大学大学院工学研究科（博士課程）原子核工学専攻
学位論文題目	英題: Transmission Dependent Convolution Subtraction Method for Correction of Scattered Photons in Quantitative Measurement by Single Photon CT and 3D Positron CT 邦題: 単一光子断層装置および3次元陽電子断層装置における定量 測定のための散乱線差引補正法の開発に関する研究
指導教官	東北大学教授 中村 尚司
論文審査委員	主査 東北大学教授 中村 尚司 東北大学教授 北村 正晴 東北大学教授 石井 慶造 東北大学教授 伊藤 正敏

## 論 文 内 容 要 旨

核医学診断法の目的である生理機能情報の画像診断を実現するために不可欠な要素として、1) 体内放射性薬剤分布画像の定量測定、2) 放射性薬剤の入力関数の定量測定、3) 放射性薬剤の体内における動態のモデル化がある。つまり放射性薬剤がいかなる時間変化で投与され、いかなる生理機能情報に従い対象部位に分布するかを正確に知ること、放射性薬剤の体内での動態を数学的に解き生理機能情報を画像化することができる。体内放射性薬剤分布を測定する装置として単一光子放出断層撮影装置(SPECT)と陽電子断層撮影装置(PET)がある。PET装置においては従来のコリメータを装着した2次元データ収集装置の次世代としてコリメータを取り外した3次元データ収集のための装置が開発されている。体内放射性薬剤分布は体内から放出される光子（単一光子：SPECT、陽電子消滅光子：PET）を放射線検出器で測定することで求められるが、分布画像の定量性に関わる誤差要因として散乱光子、および光子の吸収減衰がある。PET測定においては2本の陽電子消滅光子を同時計測するために起源を別にする2本の光子を同時計測した場合のランダム同時計測も問題となる。これら誤差要因が未解決であるために1) 体内放射性薬剤分布画像の定量測定は実現されていない。散乱光子の発生は被写体の物質に依存することから、本論文では被写体の物質情報を有するトランスミッション(外部線源透過CT撮影)測定画像を利用した散乱線補正法をSPECTおよび3次元PETについて開発したものであり、全文9章よりなる。

第1章は序論である。第2章では放射性薬剤の物理特性、核医学定量診断法に関わる体内放射能分布画像測定法と画像再構成法、さらに散乱線補正および光子吸収減衰の補正方法について述べている。第3章は本研究を遂行するために用いた核医学診断装置の説明である。

第4章では、SPECTおよび3次元PETのデータ収集を模擬するモンテカルトシミュレーションプログラムの開発を行っている。最大の目的は真の散乱線分布を得るためである。物体、線源の定義はEGS4モンテカルロコード(Nelson et al, 1985)を用いて行った。検出器部分は汎用のSPECTおよび3次元PETの形状およびデータ収集機構を模擬するように数学的に記述した。検出器部分に含んだ効果は、入射光子に対する、SPECTの場合はNaI(Tl)シンチレータ、PETの場合はBGOシンチレータの検出効率および入射光子エネルギー依存のエネルギー分解能、プロジェクション画像へのデータ記録、さらにSPECTにおいて光子のシンチレータへの入射を制限するように平行ホールコリメータを、3次元PETにおいては陽電子消滅光子を同時計

測できるようにした。その精度はSPECT、PET両方に対し、エネルギースペクトルおよびLine-spread関数を実測と計算で比較し行った。体系は直径20cmの円柱ファントムでその中心および中心から4cm、8cmに線線源をおいた。SPECTの場合は線源として $^{99m}\text{Tc}$ および $^{201}\text{Tl}$ を、PETの場合は $^{18}\text{F}$ を用いた。エネルギースペクトルの比較の結果として、SPECTの場合は計算と実験との比較で概ね一致を示したものの実験では鉛製コミメータで発生したKX線（～80 keV 付近）の影響が見られた。しかし、プロジェクション画像としてデータを収集する場合はKX線のピークよりもさらに高いエネルギー部分で行うため実際のプロジェクション画像には影響をおよぼさない。実際Line-spread関数の比較においては計算および実験で両者非常に良い一致を示した。PETの場合はエネルギースペクトルおよびLine-spread関数の両者において計算値と実験値で良い一致を示した。これにより、作成したモンテカルロシミュレーションプログラムは実際のSPECTおよび3次元PETのデータ収集を再現しており、プロジェクション画像内の真の非散乱・散乱光子の分布を別収集することができ、散乱線補正法の開発およびその精度評価に有効であることが示された。

第5章では、SPECT装置におけるトランスミッション測定用の外部線源の開発について述べている。線源は複数本の線線源を平行に並べたもので、さらにトランスミッション測定の際の散乱線の発生を抑えるために各線線源を2枚の鉛平板でコリメーションしてある。トランスミッション測定は被写体の減弱係数画像（ $\mu$ マップ）を得るためのものであるが、散乱線が混在すると減弱係数値を過小評価する。そのためにトランスミッション測定の際の散乱線の発生は最小限にする必要があるのである。線源コリメーションの最適化はコンピュータ模擬計算により行った。線源コリメーションを施さない場合、散乱線の寄与は40%程度であるが、コリメーションを装着することでその寄与を6%に減少させることができた。精度はファントム実験および人体実験で行った。直径10, 16, 20 cmの円柱ファントムに水を入れトランスミッション測定した結果、ファントム中心での減弱吸収係数値はそれぞれ $0.156 \pm 0.009$ ,  $0.154 \pm 0.009$ ,  $0.154 \pm 0.009 \text{ cm}^{-1}$ であった。 $^{99m}\text{Tc}$ 線源の141keV光子の水に対する減弱吸収係数値は $0.155 \text{ cm}^{-1}$ であるので測定値はこれに非常に近い値である。被験者によるトランスミッション測定では測定時間をファントム実験の時の10分の他に半分の5分での測定も試みた。その結果、測定時間5分の減弱吸収係数画像であっても測定時間10分のそれと劣ることなく減弱吸収係数画像を測定可能であることが示された。結論として、本SPECT用トランスミッション線源で測定されたトランスミッション画像およびその再構成画像である減弱吸収画像は、吸収・散乱線補正に用いるに十分な精度を持っていると言える。

第6章では、SPECT測定投影像 $g_{obs}(x, y)$ に含まれる散乱成分を算出・補正する方法を構築した。基本式は以下のとおりである。

$$g_{true}^n(x, y) = g_{obs}(x, y) - (g_{true}^{n-1}(x, y) \otimes s) \cdot K(x, y)$$

ここで、 $s$ は散乱線分布関数、 $K(x, y)$ は散乱フラクシオン係数、 $\otimes$ は重畳積分をしめす。右辺第2項が散乱線分布画像で、測定画像 $g_{obs} = g_{true}^0$ に散乱線分布関数 $s$ を重畳積分した後、散乱フラクシオンを掛け合わせセケリングをする。散乱フラクシオン $K$ はトランスミッション画像の関数で、トランスミッション値と目的とする核種における散乱フラクシオンをテーブル化してある。はじめに計算した散乱線分布画像を測定画像から差引補正をし、さらに次の散乱線分布画像の計算にもちいるといういわゆるIteration法により補正画像を最適化していく。散乱分布関数および散乱フラクシオン関数は核種に依存し、ここではSPECT核医学検査で広く用いられている2核種 $\text{Tc-}^{99m}$ および $\text{Tl-}^{201}$ に対しそのパラメータを最適化している。本方法の精度はモンテカルロシミュレーションおよび物理実験により評価した。モンテカルロ計算では、円柱ファントムを使った均一物質体系および人体胸部の不均一性を模擬した胸部ファントムを使いノイズ特性、絶対値の評価を行った。その結果、本散乱線補正法は散乱線補正後に統計ノイズを上昇させることなく補正誤差数パーセント以下で定量性が確保された方法であることが示された。物理実験においても同様に実際の検査に応用可能であることが示された。

第7章では、SPECT散乱線補正法の臨床応用についてであ、本方法を $\text{Tl-}^{201}$ 塩化タリウム心筋SPECT検査に適用した。塩化タリウム投与前に10分のトランスミッション測定を行い、その結果を散乱線補正および

吸収補正に使用した。その後塩化タリウム 4mCi を静脈投与し投与と同時に SPECT 測定を開始、約 40 分の測定を行った。散乱線補正および吸収補正を行ったタリウム心筋画像は、従来の画像再構成法、すなわち 360 度方向全ての方向の投影像の半分を使用しかつ散乱線および吸収補正を行わないものに比べ深部・後下壁でのタリウム集積の改善が見られた。結果、本散乱線補正法を Tl-201 塩化タリウム心筋 SPECT 検査に適用することにより心筋診断精度が向上することを示した。

第 8 章では、3 次元データ収集 PET における散乱線補正法の開発を行った。PET における光子検出は同時計測により行われるため、散乱光子の分布は被写体の外側にもあらわれる。さらにその分布は被写体形状・物質に大きく依存する。そこで散乱線分布の計算は、エミッション画像、トランスミッション画像およびその再構成画像である  $\mu$  マップを用いて行った。本散乱線補正法は、はじめに被写体内でのコンプトン散乱の分布を計算し、それに対し  $\mu$  マップ画像内における陽電子消滅点および消滅光子散乱点を仮定、その際の検出器での同時計測点での確率分布を推定していく方法である。その際に散乱線の散乱断面積、散乱光子・非散乱線光子の被写体内での光子吸収減衰を考慮している。本方法の精度はモンテカルロシミュレーションで行った。その結果、人体胸部のような複雑な場合でも有効に散乱線を除去可能であること、補正後に統計ノイズを上昇させないことが示された。

第 9 章は結論である。

以上本論文は、SPECT および 3 次元 PET における生理機能情報の定量測定を可能する手法を確立したものである。第 6、7 章の SPECT に関する研究は既に実用化されており、研究遂行に協力を頂いた秋田県立脳血管研究センターにおいては、 $^{201}\text{Tl}$ -TlCl 心筋検査および  $^{123}\text{I}$ -IMP 脳血流量検査に本研究で開発した吸収補正・散乱線補正法を適用している。

## 審査結果の要旨

SPECT および 3 次元 PET 断層撮影装置を用いた核医学診断では、体内投与した放射性薬剤が放出する光子を放射線検出器を用いて測定し、薬剤の分布を画像化する。しかし、放出光子の体内での吸収減衰および散乱放射線の発生により、分布画像の定量測定が実現されていない。本論文は、被写体の物質情報を有するトランスミッション測定画像を利用し、SPECT および 3 次元 PET 測定における散乱線の影響を補正する方法を開発したものであり全文 9 章よりなる。

第 1 章は序論である。第 2 章では放射性薬剤の物理特性、核医学定量診断法に関わる体内放射能分布画像測定法と画像再構成法、さらに散乱線補正および光子吸収減衰の補正方法について述べている。第 3 章は使用した核医学診断装置の説明である。

第 4 章では、SPECT および 3 次元 PET のデータ収集を模擬するモンテカルロ計算プログラムを EGS4 コードをもとに開発している。エネルギースペクトルおよび Line-spread 関数の実測値との比較で精度を確認しており散乱線補正法の開発に有効であることを示している。第 5 章では、SPECT トランスミッション測定用の線源の開発について述べている。複数の線源を利用したもので、トランスミッション測定の際の散乱線の発生を抑えるための線源コリメーションの最適化をコンピュータ模擬計算で行っており、物理実験および臨床実験で短い測定時間においても十分な測定精度があることを確認している。

第 6 章では、SPECT 散乱線補正法の構築を行っており、コンピュータ模擬計算では散乱線除去後にノイズを上昇させることなく散乱線が補正可能であることを示している。第 7 章では、本散乱線補正法を Tl-201 塩化タリウム心筋 SPECT 検査に適用することにより心筋診断精度が向上することを示している。

第 8 章では、3 次元 PET における散乱線補正法の開発を行っており、その分布は被写体に大きく依存するが、トランスミッション画像を利用することでその補正が可能であることを示している。コンピュータ模擬計算では胸部のような複雑な場合でも有効に散乱線を除去することを確認している。

第 9 章は結論である。

以上本論文は、SPECT および 3 次元 PET における生理機能情報の定量測定を可能する手法を確立したもので、核医学・画像工学の発展に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は博士（工学）の学位論文として合格と認める。